

ЭПТ 2018



ACED 2018

УДК 62-83:621.314.26

## СИСТЕМА ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОГО ПЛАВНОГО ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

## FREQUENCY-CONTROLLED SOFT START SYSTEM FOR HIGH-VOLTAGE SYNCHRONOUS DRIVES

**Ткачук Андрей Александрович**, канд. техн. наук, главный конструктор по высоковольтной преобразовательной технике ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», Россия, 620137, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 1д. E-mail: tkachuk@asc-ural.ru. Тел.: +7 (343) 360-05-01 (доб. 1079)

**Шилин Сергей Иванович**, канд. техн. наук, начальник научно-инженерного центра ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», Россия, 620137, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 1д. E-mail: shilin@asc-ural.ru. Тел.: +7 (343) 360-05-01 (доб. 1007)

**Andrey A. Tkachuk**, Ph. D. in Technical Sciences, Chief designer for MV converter equipment CJSC «Automated Systems and Complexes», Russia, 620137, Ekaterinburg, Studencheskaya street, 1-D. E-mail: tkachuk@asc-ural.ru, Ph.: +7 (373) 360-05-01 (add. 1079)

**Sergey I. Shilin**, Ph. D. in Technical Sciences, Chief Officer of Engineering Research Centre CJSC «Automated Systems and Complexes», Russia, 620137, Ekaterinburg, Studencheskaya street, 1-D. E-mail: shilin@asc-ural.ru, Ph.: +7 (373) 360-05-01 (add. 1007)

**Аннотация:** В докладе приведены результаты разработки и промышленного внедрения высоковольтного тиристорного преобразователя частоты для плавного пуска синхронного электропривода шаровой мельницы мощностью 2 МВт.

**Abstract:** The report demonstrates the results of development and commercial introduction of a high-voltage thyristor frequency converter for soft start of synchronous drive of a ball mill with power of 2 MW.

**Ключевые слова:** тиристорный преобразователь частоты, высоковольтный, синхронный электропривод, шаровая мельница.

**Key words:** thyristor frequency converter, high-voltage, synchronous drive, ball mill.

### АКТУАЛЬНОСТЬ

Во многих отраслях промышленности: горно-обогатительной, цементной, металлургической и ряде других, наибольшее распространение находит нерегулируемый по скорости электропривод (ЭП) переменного тока [1,2]. Самыми энергоёмкими технологическими процессами являются процессы дробления, измельчения, фильтрации, перекачивания и компрессии, доля расхода электроэнергии электроприводами которых составляет 90% общего потребления предприятия [3].

Ответственным режимом нерегулируемых ЭП является пуск их в работу. Это особенно актуально при пуске высоковольтных синхронных электроприводов с номинальным напряжением 3, 6 или 10 кВ. Электрические машины такого класса напряжения являются достаточно энергоёмкими объектами. Зачастую мощность единичного двигателя соизмерима с мощностью питающей сети. Прямой пуск синхронных электроприводов от сети, особенно с нагруженными механизмами имеющие большой момент инерции и начального

статического сопротивления, обладает рядом известных недостатков. При пуске возникают значительные по величине и продолжительные по времени токи и удары момента на валу. Частые прямые пуски негативно сказываются на системе электроснабжения и значительно снижают ресурс технологического оборудования [4]. Поэтому ограничение величины пусковых токов и моментов, обеспечение плавного пуска, рационализация графика включения и отключения синхронных высоковольтных электроприводов является весьма актуальной задачей [5].

### КЛАССИФИКАЦИЯ УПП

Синхронные электроприводы по характеру нагрузки можно разделить на две большие группы. К первой группе относятся электроприводы с механизмами имеющие квадратичную зависимость момента статического сопротивления от скорости вращения. Это так называемые механизмы центробежного принципа действия: насосы, вентиляторы, турбокомпрессоры, дымососы, эксгаустеры и т.п. Ко второй группе относятся электроприводы с

механизмами имеющие постоянный момент статического сопротивления или слабо зависящий от скорости вращения. Например, такими механизмами являются: барабанные мельницы, дробилки, трубные печи, конвейеры, шнековые питатели, поршневые насосы и т.п. Характерным представителем механизмов с тяжёлыми условиями пуска являются барабанные мельницы, у которых в качестве мелющих средств применяются чугунные шары или стержни. Характер движения шаров в мельнице определяется скоростью вращения барабана. В начале трогания момент может быть равен моменту при установившемся режиме или превышать его на 20-30% [3].

## ОБЗОР УСТРОЙСТВ ПЛАВНОГО ПУСКА

Для первой группы электроприводов ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы» разработаны и серийно производятся устройства плавного пуска (УПП) на базе высоковольтного тиристорного преобразователя напряжения типа ПАД-В и ПСД-В [1,2,4]. Шкала таких УПП охватывает практически весь диапазон мощностей от 0,2 до 12 МВт и номинальных напряжений от 3 до 10 кВ применяемых в промышленности электроприводов. Однако известно, что устройства плавного пуска, выполненные на базе тиристорный преобразователей напряжения, не могут обеспечить удовлетворительного пуска двигателя с полной нагрузкой при номинальном токе. Они обеспечивают лучшую экономическую эффективность при плавном пуске механизмов центробежного принципа действия.

Для удовлетворения требуемых характеристик пуска электроприводов второй группы с технической и экономической сторон целесообразно применение тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ), выполненного по структуре: управляемый выпрямитель – автономный инвертор тока. Это известная классическая схема, полностью реализованная на однооперационных тиристорах [6]. Она состоит из мостового выпрямителя, сглаживающего дросселя и мостового инвертора с естественной коммутацией тириستоров. В отличие от высоковольтного преобразователя частоты на базе автономного инвертора напряжения преобразователи с инвертором тока проще, дешевле и надёжнее. При частотно-регулируемом пуске достигается линейное и плавное нарастание скорости вращения вала синхронного двигателя и механизма до номинальной скорости. Способ регулирования основан на изменении частоты и амплитуды тока на статоре синхронного двигателя в процессе разгона в функции стабилизации электромагнитного момента. Вследствие чего при номинальной нагрузке ток синхронного двигателя не превышает 1,2 номинального тока.

Постоянная потребность в устройствах плавного пуска высоковольтных ЭП, выполненных на базе тиристорных преобразователей частоты, относительная простота схемного решения при сопряжении с системой электроснабжения, высокий уровень автоматизации и надёжность в эксплуатации обусловили целесообразность разработки и серийного производства рядом предприятий комплектного электротехнического оборудования для частотно-регулируемого плавного пуска синхронного двигателя. К наиболее популярным производителям оборудования относятся: ОАО «ВНИИР», ООО «ЧЭАЗ-ЭЛПРИ» (г. Чебоксары), ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) и ряд других.

Изучение и анализ технических характеристик электротехнического оборудования для реализации систем частотно-регулируемого плавного пуска различных фирм показал, что они в основном аналогичны и соответствуют современному уровню схемотехники подобного класса устройств. Учитывая регулярный спрос и интерес со стороны потенциальных заказчиков, ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы» разработан, изготовлен и внедрён на цементном заводе синхронный электропривод шаровой мельницы мощностью 2 МВт с частотным преобразователем на базе автономного инвертора тока типа ПЧСД-В-Г-250-6к-4 в контейнерном исполнении. В табл. 1 приведены его основные технические характеристики.

Таблица 1.  
Технические характеристики ПЧСД-В-Г-250-6к-4

Наименование параметра	Значение
Номинальное напряжение силовой питающей сети, кВ	6
Допустимое отклонение напряжения питания, %	± 15
Номинальное значение входного и выходного тока, А	250
Максимально допустимый пусковой ток (5 мин.), А	300
Количество поочередно запускаемых двигателей	4
Перерыв между пусками с максимальным током, мин	5
Ток термической стойкости (не более 3 секунд), кА	10
Диапазон регулирования выходного тока, %	0 - 100
Диапазон регулирования выходной частоты, Гц	0 - 60
Пределы регулирования времени пуска, с	5 - 300
Габаритные размеры без ЯВД (ВхШхГ), мм	2350 × 4000 × 1000
Масса (не более), т	3,7

# УСТРОЙСТВО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Преобразователь типа ПЧСД-В-Г для группового частотно-регулируемого плавного пуска СД, созданный ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», структурно и по техническим характеристикам соответствует аналогичным. Однако есть и некоторые отличительные особенности. Меньшие массогабаритные показатели и стоимость. Используется силовая полупроводниковая, защитная и коммутационная элементная база преимущественно российских предприятий. Оригинальный алгоритм калибровки датчика положения ротора синхронного двигателя обеспечивает простоту наладки и настройку на механизмы с различными характеристиками [2]. Это достигнуто благодаря гармоничному сочетанию науки, разработки и производства, высокому уровню организации и стратегическому направлению ЗАО «АСК» на развитие отечественной техники и технологий. На рис. 1 приведена схема подключения ПЧСД-В-Г в систему электроснабжения шаровой мельницы. Конструктивно преобразователь состоит из пяти основных шкафов (см. рис. 2). Количество ячеек выбора двигателя (ЯВД) определяется количеством поочерёдно запускаемых СД в системе группового плавного пуска. В изображённой схеме запускаются четыре двигателя. В шкафу управления (ШУ) сосредоточена информационная низковольтная электроника, составляющая основу системы управления, реле, клеммы для подключения внешних кабелей и графическая сенсорная панель,

которая обеспечивает удобный человеко-машинный интерфейс. Система управления построена по принципу распределённой вычислительной сети и содержит несколько микроконтроллеров и ПЛИСов. В шкафу с токоограничивающими реакторами (ШТР) размещены три воздушных реактора L1-L3 необходимые для улучшения электромагнитной совместимости с питающей сетью, коммутации тиристоров и ограничения токов короткого замыкания в случае аварийных процессов. Также ШТР содержит быстродействующий вакуумный контактор КМ1 обеспечивающий режим байпаса при достижении номинальной скорости двигателя. После включения штатная ячейка двигателя, а КМ1 выключается. Шкафы управляемого выпрямителя (ШУВ) и инвертора тока (ШИТ) идентичны друг другу и состоят из унифицированных тиристорных блоков типа СТВ-250-6к-1. Каждый блок содержит по четыре последовательно соединённых тиристора, защитные RC-цепи и оптоволоконные драйверы. Блоки легко извлекаются из шкафа посредством специальных салазок, что значительно повышает ремонтопригодность изделия в целом. Также шкафы имеют датчики тока и напряжения, которые соединяются через волоконно-оптическую линию связи с системой управления в шкафу управления. Шкаф сглаживающих дросселей (ШСДР) содержит два расположенных друг над другом воздушных реактора. Для увеличения взаимной индуктивности реализуется согласованное включение реакторов.

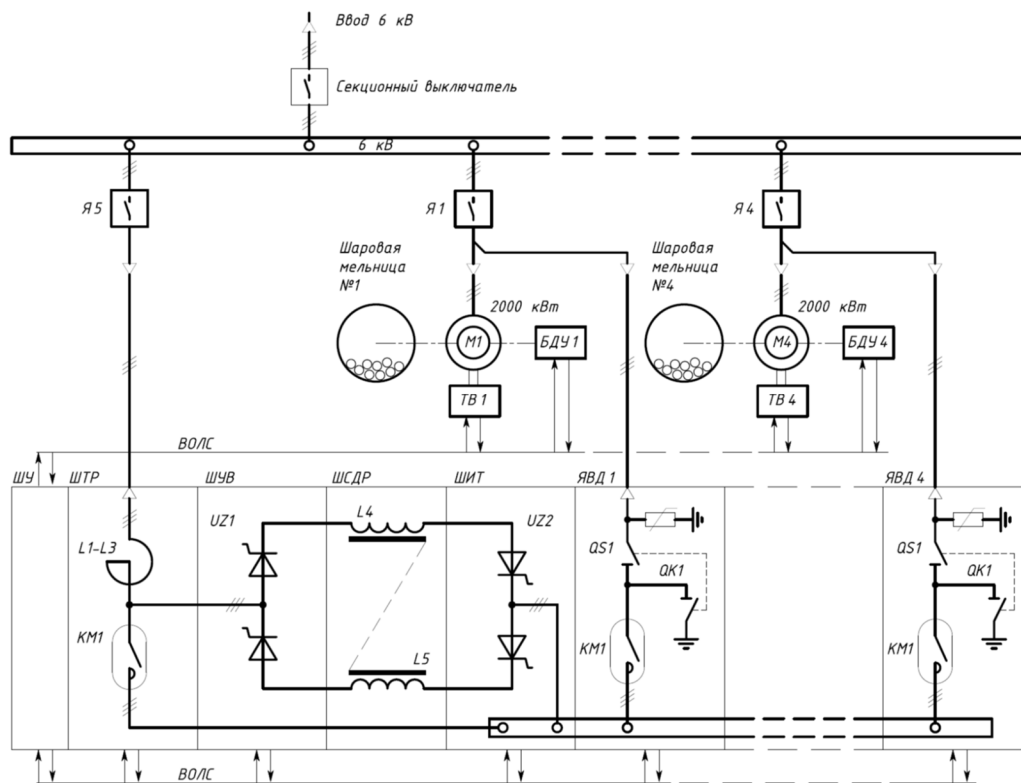


Рис. 1. Схема системы частотно-регулируемого пуска группы синхронных ЭП шаровых мельниц



Рис. 2. Внешний вид преобразователя частоты ПЧСД-В-Г-250-6к-4

Управление тиристорными возбудителями (ТВ) и сбор информации с блоков датчиков угла (БДУ) система управления осуществляет посредством волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Территориально возбудители, датчики и преобразователь могут быть на значительном расстоянии друг от друга. В условиях сильного электромагнитного фона генерируемого преобразователем, ВОЛС обеспечивает высокую помехозащищённость информации на любом удалении от источника.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специалистами ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы» накоплен значительный опыт в разработке, производстве, внедрении и наладке высоковольтных систем частотно-регулируемого плавного пуска на базе тиристорного инвертора тока. Системы в полной мере соответствуют предъявляемым требованиям, положительно зарекомендовали себя в эксплуатации и являются надёжными и конкурентоспособными изделиями в данном сегменте рынка.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ткачук А.А., Кривовяз В.К. Опыт разработки и внедрения преобразователей для плавного пуска высоковольтных электроприводов // Сб. науч. тр. 15-й международной НТК «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург: ФГАОУ ВПО

«УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. С. 59-62.

2. Ткачук А.А., Шилин С.И. Преобразователь частоты с инвертором тока для плавного пуска высоковольтных синхронных электроприводов // Сб. докл. 6-й международной НПК в рамках спец. форума «Евро Build Russia» (19 апреля 2017 г.). Екатеринбург: изд-во УМЦ УПИ, 2017. С. 163-166.

3. Андреев С.Е., Петров В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. - 415 с.

4. Ткачук А.А., Шилин С.И. Системы плавного пуска двигателей на основе высоковольтных тиристорных преобразователей // Сб. науч. тр. 9-й международной (20-й всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь: изд-во Пермского нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. С. 310 - 313.

5. Ткачук А.А. Электромагнитная совместимость тиристорных преобразователей напряжения в системах плавного пуска высоковольтных электроприводов // Сб. науч. тр. 16-й международной НТК «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. С. 63-66.

6. Виницкий Ю.Д., Гельфанд Я.С., Сытин А.П. Тиристорные пусковые устройства в электроэнергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 256 с